

一种避免 Random Waypoint 移动模型速度衰减的方法

孙国栋, 廖明宏

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

E-mail: gdSun_ hit@163. com

摘 要: 在被广泛使用的 Random Waypoint 移动模型中, 随着模拟的进行节点平均速度呈下降趋势. 这样的速度衰减现象对自组网等移动系统的某些时间平均性能评价是不利的, 会增加精确分析的复杂性; 以结点平均速度在整个模拟过程中保持稳定为前提而得到的试验结论也是不可靠的. 本文对速度衰减现象进行了概率分析并证明了它是不可避免的, 最后提出了改进的 Random Waypoint 移动模型 iRWP, 试验验证 iRWP 能有效避免了速度衰减的发生.

关 键 词: 无线自组网络; 移动模型; 速度衰减

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2006)04-0600-04

Method of Avoiding the Speed Decay in Random Waypoint Mobility Model

SUN Guo-dong, LIAO Ming-hong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The stabilization of the average nodal speed was critical to research some performances evaluation and analysis of Ad hoc networks by simulation. Random Waypoint Mobility Model suffers from speed decay—average nodal speed decreased until converging to some long-term average. Such decay is unsound for simulations that collect results averaged over time, complicating the experiments, and the assumption that steady-state lasts over all simulation makes the results unreliable, collected before average nodal speed arrives at real steady-state. This paper demonstrates via mathematical analysis that speed decay is in general inevitable deriving some conclusions, and then using them provides an improved model iRWP that can effectively avoid the speed decay.

Key words: Ad hoc networks; mobility model; speed decay

1 引 言

近年来, 无线自组网络和传感器网络(一种特殊的自组网)受到学术界和业界的越来越多的关注. 它们是一种自治的、独立于特定的基础结构而完成计算和通信任务的动态、多跳、移动、无线的网络系统^[1-3]. 它们自身的和应用环境的动态性给整个网络体系结构各层(从物理层, 分布介质访问到路由等)的设计带来了巨大挑战^[4]. 影响网络整体性能的因素有很多, 比如说, 结点移动引起的链路失效、路由策略节能效果差导致的网络生命周期短等等.

目前, 对自组网和传感器网络的协议、算法、和性能评价等方面的研究很难直接利用和领域相关的实际环境, 模拟便成了不可或缺的工具. 研究人员可以通过模拟来考察任意规模的系统而不必事先建立实际的环境, 通过控制模拟时的各种输入参数或协议, 可以对无线移动系统多方面性能进行分析并得出相应的仿真结果. 当然, 当模拟为自组网新开发的一个协议或对某方面性能进行评价时, 就必须首先确定某个移动模型来描述移动系统中移动结点的运动特征.

基于移动模型的性能分析在无线网络的设计中起着相当重要的作用. 移动模型的主要用途是来模拟真实环境下结点

的移动行为, 对移动模型的选择以及对其参数的选择对所获的仿真结果有重要影响^[5]. 目前针对自组网提出的 MAC 协议、路由协议、组播算法等针对不同的移动模型或同一模型不同参数其性能各有优劣. 移动模型按不同的标准有不同的分类^[6], 在自组网协议性能评价中广泛使用的有三个移动模型: Random Walk 移动模型^[5]、Random Waypoint 移动模型^[7]和 Random Direction 移动模型^[8]. 据统计^[9]到目前为止在自组网及相关的试验中, RWP(Random Waypoint Mobility)移动模型是使用频率最高的移动模型, 已经有很多研究人员对它自身的特点以及它对自组网性能评价的影响做出了广泛的研究, 得出的主要结论包括: 在 RWP 中, 长时间的运动后结点并不是在模拟区域中均匀分布而是出现在区域中心的概率较大^[10], 并且与移动参数选取有关, 文献[11]给出了 RWP 的结点分布密度; 文献[9]阐述了随着模型的运行, 结点平均速度有下降(衰减)的趋势, 一般过一段时间后才能稳定, 并证明了如果设结点最小速度为 0, RWP 中结点的平均速度持续衰减最终会降为 0.

在模拟中, 自组网等移动系统的行为和性能紧密的依赖与它所用模型结点的移动行为. 为了在模拟中研究基于时间的平均性能, 最关键的是要保证模型中结点的平均速度在模

拟过程中保持稳定, 否则, 在系统中结点平均速度未达到稳定之前收集到的数据是不可靠的, 会影响性能的时间平均度量. 本文通过几何概率等知识和相关的数学推导解释了矩形模拟区域的 RWP 模型出现速度衰减现象的原因, 并给出了改进模型 iRWP. iRWP 使结点从运动开始就处于稳定态, 从而有效避免速度衰减的发生, 试验验证 iRWP 能保证结点平均速度在整个模拟期间处于比较稳定的水平.

2 Random Waypoint 模型的分析

2.1 关于模型的若干定义

Random Waypoint 移动模型中各结点的运动是相互独立的, 每个结点在模拟区域内按均匀分布随机选择一个位置 S 作为运动起始点, 然后再按均匀分布随机选择一个位置 D 作为运动的目标, 最后按均匀分布在 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 之间随机选择一个速度值 V 匀速运动到终点; 到达目标后在 $(0, P_{\max})$ 之间均匀选择一个暂停时间值 T_p , 暂停结束后以上一步的终点作为起始点重复上述动作. 下面为方便讨论, 对模型刻画的运动过程作简单定义.

定义 1. 称从 S 到 D 的运动阶段和其后的暂停阶段为一个 step. 结点的运动就是由各个连续的 steps 所组成.

定义 2. 模拟区域是一个 $a \times b$ 的矩形. 许多文献中为方便讨论采用了圆形模拟区域或给每一次目标位置的选择限定在一个有限半径的圆内, 这里采用模拟研究中常用的矩形模拟区域.

定义 3. 称模拟过程进行较长的一段时间后 n 个结点所表现的比较恒定的平均速度为稳定态速度, 记为 V_{ss} .

定义 4. 称随着模拟过程的进行结点平均速度起伏不定, 总体表现为不断降低的趋势为速度衰减. 速度衰减过程是否能终止于稳定态速度取决于模拟时参数的配置, 尤其是速度变化范围.

2.2 V_{ss} 的期望

当模拟时间 T 足够大时, 可以用 n 个结点所经历 steps 的距离和与 nT 的比值来表示 V_{ss} 的期望值, 又因为各结点的运动是相互独立的, 所以考查一个结点的运动即可.

$$\bar{V} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{n=1}^{step(T)} L_n}{T} = \frac{\sum_{n=1}^{step(T)} L_n}{\sum_{n=1}^{step(T)} (T_m + T_p)} = \frac{\frac{1}{step(T)} \sum_{n=1}^{step(T)} L_n}{\frac{1}{step(T)} \sum_{n=1}^{step(T)} (T_m + T_p)} = \frac{E[L]}{E[T_m] + E[T_p]} \quad (1)$$

式(1)中, L_n 、 T_m 、 T_p 分别代表结点在第 n 个 step 中运动的距离、运动时间和暂停时间; $step(T)$ 代表时刻 T 时已运动的 step 数.

2.3 各 step 运动距离的期望

由定义 1 可以把结点的 RWP 运动看作离散的 step 随机序列 $\{S_i\}_{i=1}^{step(T)}$, 也可把它看作是随机点的序列 $\{P_i\}_{i=1}^N$. 每一个 step 的对应的距离 $Li(\overrightarrow{P_i P_{i+1}})$ 也构成一个随机序列集合 L. 但是, L_i 之间并不是随机独立的, 因为每一个 step 的终

点是下一个 step 的起点. 如果只取序号为奇数的 steps, 其构成 $\{S_i\}_{i=1}^{step(T)}$ 的子集, 由此确定各 step 的距离集合:

$$L = \{ P_1-P_0, P_3-P_2, P_5-P_4, \dots \},$$

同理可确定偶数 step 的距离集合:

$$L = \{ P_2-P_1, P_4-P_3, P_6-P_5, \dots \},$$

易见, L 中的元素相互独立, L 中的元素也相互独立. 如果把模拟区域 $a \times b$ 看成一个凸集, 集合 L、L 中的每一元素都是由一对随机选择的点偶确定的并且具有相同的概率分布. 由几何概率知识可知, 该凸集上任意按均匀分布独立选择的两点间距离的期望为:

$$E[L] = \frac{1}{15} \left[\frac{a^3}{b^2} + \frac{b^3}{a^2} + L_{ab} \left(3 - \frac{a^2}{b^2} - \frac{b^2}{a^2} \right) + \frac{5}{2} \left(\frac{b^2}{a} \log \frac{a+L_{ab}}{b} + \frac{a^2}{b} \log \frac{b+L_{ab}}{a} \right) \right] \quad (2)$$

L_{ab} 是模拟区域的对角线长, 因为 $E[L] = E[L], L = L$, 所以 $E[L] = (2) \cdot L$ 的概率密度在文献[13]中有具体分析.

2.4 各 step 运动时间的期望

一个 step 中运动时间 T_m 是一个随机变量, 它的取值范围是 $(0, \frac{L_{ab}}{V_{\min}}]$, 下面是它的期望值 $E[T_m]$ 的推导过程:

$$E[T_m] = E\left[\frac{L}{V}\right] = E[L]E\left[\frac{1}{V}\right] = E[L] \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left(\frac{1}{V}\right) f_v(v) dv$$

因为对每一个 step 其距离和速度的确定是独立的, 所以式(1)成立, 并且速度的选择符合均匀分布, $f_v(v) = \frac{1}{V_{\max}-V_{\min}}$ $v \in [V_{\min}, V_{\max}]$. 所以有: $E[T_m] = E[L] \frac{\log(V_{\max}/V_{\min})}{V_{\max}-V_{\min}}$ (3)

文献[9]中通过 L 的概率密度和相关推导给出了变量 T_m 的概率密度, 但是该文献对 Random Waypoint 移动模型进行了一定的简化, 所得出的 L 的概率密度公式不适合矩形模拟区域.

2.5 各 step 暂停的时间期望

一个 step 中运动时间 T_p 是一个随机变量, 它按均匀分布取自 $(0, P_{\max})$, 所以可知 T_p 的概率密度为: $f_{T_p}(t_p) = \frac{1}{P_{\max}}$ $t_p \in (0, P_{\max})$, 进而求出 $E[T_p]$:

$$E[T_p] = P_{\max} / 2 \quad (4)$$

2.6 对稳定态速度 V_{ss} 的分析

把以上求出的 $E(L)$ 、 $E(T_m)$ 、 $E(T_p)$ 代入式(1)得:

$$V = \frac{E[L]}{E[T_p] + E[T_m]} = \frac{E[L]}{\frac{P_{\max}}{2} + E[L] \frac{\log(V_{\max}/V_{\min})}{V_{\max}-V_{\min}}} = \frac{V_{\max}-V_{\min}}{\log(V_{\max}/V_{\min})} \quad (5)$$

当所有 steps 中暂停时间为 0 时, 式(5)取等号. 当模拟时间 T 足够长时, V 可以表示 $E[V_{ss}]$. 如果运行时间足够长, 结点进入到稳定态, 某个 step 的 L 和速度 V 已随机独立选定时, 在这个 step 上的运动时间 T_m 和 V 成反比. V 越大它在 0 到 T 的时间轴上覆盖的时间长度就越小, 如果不考虑暂停时

间, 则 V 的概率密度等于: $f_v(v) = k/v$. 对其积分有:

(v)dv=1, 进而解得:

$$f_{V_{ss}}(v) = \begin{cases} 1/v \log(V_{\max}/V_{\min}) & V_{\min} < v < V_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

如果不考虑暂停时间, 由稳定态速度的概率密度可以求出 V_{ss} 的期望:

$$E[V_{ss}] = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} v f_{V_{ss}}(v) dv = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\log(V_{\max}/V_{\min})} \quad (7)$$

式(7)和式(5)取等号时是一致的, 说明式(6)成立。如果考虑暂停阶段, 稳定态的速度概率密度应为:

$$f_{V_{ss}}(v) = f_{V_{ss}}(v|pause)P_{pause} + f_{V_{ss}}(v|nopause)(1-P_{pause}) \quad (8)$$

$$E[V_{ss}] = (1-P_{pause})E[V_{ss}]$$

其中, $P_{pause} = \frac{E[T_p]}{E[T_m] + E[T_p]}$ 。由 $f_v(v)$ 可知 $\overline{V_{init}} = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$ 表示各结点的第一个 step 的平均速度, 再由式(5)

有:

$$\frac{\overline{V}}{\overline{V_{init}}} = \frac{(V_{\max} - V_{\min}) / [P_{\max}(V_{\max} - V_{\min}) / 2E[L] + \log(V_{\max}/V_{\min})]}{(V_{\max} + V_{\min}) / 2}$$

$$\text{亦即, } \frac{\overline{V}}{\overline{V_{init}}} = \frac{2(V_{\max}/V_{\min} - 1)}{(V_{\max}/V_{\min} + 1)\log(V_{\max}/V_{\min})} \quad (9)$$

在不考虑暂停时间的情况下, 由微积分知识可知: 式(5)中 $V_{\min} = 0$ 时, $\overline{V} = 0$; $V_{\max} > V_{\min} > 0$ 时式(9)右端小于 1; $V_{\max} = V_{\min} > 0$ 时式(9)右端等于 1; 在考虑暂停时间的情况下总有 $\overline{V} < \overline{V_{init}}$ 。所以, 只有在 step 中不包含暂停时间时, 并且结点是以前常速完成全部模拟过程的情况下才不会出现速度衰减现象; 由式(8)可以看到, 稳定态的速度分布并不总是像初始 step 时那样的均匀分布。

3 改进的 RWP 移动模型

在自组网等移动系统的性能评价中出现的速度衰减现象是应该被避免的, 因为在速度达到稳定态前的速度衰减的过程中所收集到的模拟数据是不可靠的。避免或减小这种负面影响的的方法目前大体有三种。一种方法是令 $V_{\min} = V_{\max}$, 或令 V_{\min} 接近于 V_{\max} 也就是减小速度变化范围, 这种方法能有效降低速度衰减的持续时间, 但与此同时也限制了结点的速度变化范围, 而在一些模拟试验中希望结点的运动速度有较宽的变化范围。另一种方法是长时间的运行模拟然后舍弃刚开始一段时间内收集到的数据, 这种方法的问题是不知道应该舍弃多长时间的模拟数据, 也就是现在还不能精确的计算出速度衰减持续的时间; 文献[6]中给出了经验值 1000 秒, 但是对有的模拟试验来说到达稳定态 1000 秒是不够的。这两种方法不能从根本上解决问题, 本文通过令结点的第一个 step 以稳定态分布选择相关参数, 从而使结点平均速度从模拟开始就处于稳定态。

下面是改进的 RWP 模型 iRWP(improved RWP):

1. 各结点以概率 P_{pause} 决定是否开始运动。具体实现方法为: 各结点生成一个 0, 1 之间均匀分布的随机数 U , 如果 $U < P_{pause}$, 则该结点保持静止。

2. 如果结点选择运动, 则按 $f_{V_{ss}}(v)$ 随机选择一速度值。

3. 如果结点选择静止, 该结点生成一个 0, 1 之间均匀分

布的随机数 U , 令暂停时间长度 $P = P_{\max}(1 - \sqrt{1-U})$, P 的推导过程详见附录。

4. 每个结点完成第一个静止或运动的 step 后, 接下来所有 steps 均按 RWP 中 $f_v(v)$ 、 $f_{T_p}(tp)$ 分别从 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 、 $[0, P_{\max}]$ 中选择速度和暂停时间。这里假设 V_{\min} 大于 0。

4 模拟试验

为了验证分析得到的结论和改进模型的有效性, 本文应用 ns-2 模拟软件做了若干试验。首先, 在不同大小的模拟区

表 1 矩形模拟区域 step 距离长度期望

a	b	$E[L]_{sim}$	$E[L]$
100	10	33.794	33.753
100	40	38.181	38.253
100	60	42.305	42.391
100	80	46.974	47.077
100	100	52.019	52.141
400	200	160.94	160.654
800	600	366.918	366.113
1000	800	469.742	470.767

域下对一个结点运行 10^5 个 steps, 记录每个 step 的距离长度, 求出改模拟区域下 step 的平均距离长度, 记为 $E[L]_{sim}$, 然后和式(2)的 $E[L]$ 进行对比。

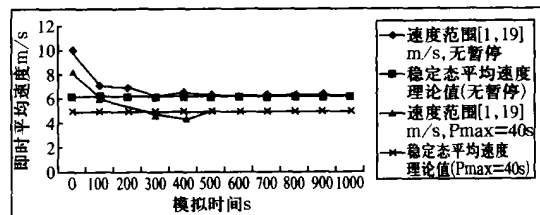


图 1 RWP 结点即时平均速度变化图

从表 1 可以看出, 模拟试验得到的 L 的平均值和理论值基本一致, 所以式(2)是可以应用的。在接下来的关于结点头

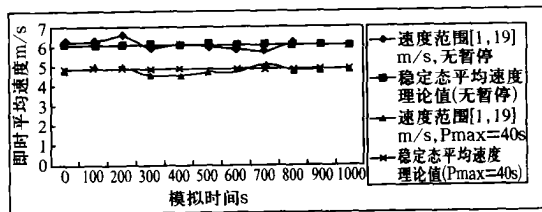


图 2 iRWP 结点即时平均速度变化图

均速度的模拟试验中, 令模拟区域为 $1000 \times 800m^2$, 对 40 个结点进行试验, 每次试验均进行 1000s, 每组试验重复 10 次取所测变量的均值; 速度变化范围和暂停时间的范围在每组试验中各有不同。本试验使用了随机数发生器。

从图 1 可以看出传统的 Random Waypoint 移动模型下无论有无暂停时间结点即时平均速度在运行初期都有下降的趋势出现速度衰减现象, 最后收敛到所计算的理论值附近, 并不是像有些研究所假设的那样在整个模拟过程中结点平均速度保持稳定, 所以, 在速度衰减时期收集到得数据不能可靠的用于证明某些基于时间平均的性能的好坏. 图 2 表明了改进后的 Random Waypoint 移动模型 iRWP 能使结点即时平均速度在整个模拟过程中非常稳定, 并且和计算的稳定态平均速度理论值基本吻合. 试验验证 iRWP 能有效地保持模拟过程中节点即时平均速度的稳定.

5 结 论

本文分析了一种普遍使用的自组网移动模型 Random Waypoint 模型的运动节点速度衰减现象, 并给出理论解释, 最后提出一个改进的模型 iRWP. iRWP 能保证运动节点在整个模拟过程中保持即时平均速度的稳定, 进而避免了速度衰减现象. 实验表明改进的方法是有效地, 从而有助于正确评价以运动节点即时平均速度保持稳定为前提的自组网等移动系统的有关协议、算法、连通度等的时间平均性能.

References:

[1] Zygmunt J Hass, Jing Deng, Ben Liang, et al. Wireless Ad hoc networks[M]. Boston, MA, Addison Wesley 2001.

[2] Hairong Qi, Sitharama Iyengar S, Krishnendu Chakrabarty. Distributed sensor networks—a review of recent research[J]. Journal of the Franklin Institute, 2001, 338: 655-668.

[3] Malik Tubaishar, Sanjay Madria. Sensor networks: an overview [J]. IEEE Potentials Apr-May, 2003: 20-23.

[4] James P G Sterbenz, Rajesh Krishnan, Regina Rosales Hain. Survivable mobile wireless networks: issues, challenges and research directions[C]. In: Proc. ACM Workshop on wireless security, September, 2002: 31-40.

[5] Vanessa Ann Davies. Evaluating mobility models within Ad hoc network[D]. Doctor Dissertation, Colorado School of Mines, 2002.

[6] Tracy Camp, Jeff Boleng, Vanessa Davies. A survey of mobility models for Ad hoc network research[J]. Wireless Communication & Mobile Computing, Special Issue on Mobile Ad hoc Network: Research, Trends and Applications, 2002, 2(5): 483-

502.

[7] Johnson D, Maltz D. Mobile computing[M]. Kluwer Academic Publishers, 1996.

[8] Royer E, Melliar-Smith P M, Moser L. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks[C]. In: Proc. IEEE, ICC, June, 2001: 857-861.

[9] Jungkeun Yoon, Mingyan Liu, Brian Noble. Random waypoint considered harmful[C]. In: Proc. 21st Ann. Joint Conf. IEEE Computer and Comm.Soc. April, 2003: 1312-1321.

[10] Bettstetter C, Krause O. On border effects in modeling and simulation of wireless ad hoc networks[C]. The 3rd IEEE Int l Conf on M WCMN, August, 2001.

[11] Bettstetter C, Giovanni Resta, Paolo Santi. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(3): 257-269.

[12] Knuth D E. The art of computer programming, Vol. 2, Seminumerical algorithms [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.

[13] Ghosh B. Random distances within a rectangle and between two rectangles[J]. Bull. Calcutta Math, 1951, 43: 17-24.

附 录

iRWP 节点第一个 step 暂停时间 P 的分布与选择.

如果一个节点在初始时刻选择了暂停, 那么就要确定它的暂停时间长度 P, 为满足稳定态时的暂停时间分布, 为此, P 应为稳定态下的一个暂停时间 T_p 内随机一刻到暂停结束的时间长度. 已知 $f_{T_p}(t_p)$ 和随机过程中的更新原理可得到 P 的分布函数:

$$F_p(p) = \frac{\int_0^p (1 - F_{T_p}(t_p)) dt_p}{E[T_p]} \tag{a}$$

已知: $0 \leq t_p \leq P_{\max}$ 时, $F_{T_p}(t_p) = \frac{t_p}{P_{\max}}$, 代入式(a)得: $F_p(p) = \frac{p^2 + 2pP_{\max}}{P_{\max}^2}$ 根据文献[12] 中的由均匀随机数生成任意分布随机数的方法, 先求出 $F_p(p)$ 的反函数: $F_p^{-1}(u) = P_{\max}(1 - \sqrt{1-u})$, 再令 $P = F_p^{-1}(U)$, 其中 U 是在 0, 1 之间均匀选则的随机数.